

VŠB Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Konstanty synchronního stroje a jejich použití
Measuring and Use of Synchronous Machine Parameters

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Orság

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Konstanty synchronního stroje a jejich použití
Measuring and Use of Synchronous Machine Parameters

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Popis synchronního stroje a jeho provoz
3. Definice konstant synchronního stroje
4. Vzorce pro výpočet konstant synchronního stroje
5. Použití konstant synchronního stroje v elektrotechnické praxi
6. Měření konstant synchronního stroje ve školních podmínkách
7. Chyby v měření a jejich vliv na přesnost výpočtů

Seznam doporučené odborné literatury:

Skripta VŠB-TUO, normy, doporučené předpisy


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 5.5.2014

.....
Orság

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především mému vedoucímu práce panu Ing. Václavovi Čechovi, Ph.D za převzetí mého tématu bakalářské práce, aktivní a odborné vedení. A také panu Ing. Jindřichu Olšanskému, za odborné vedení a informace i nad rámec daného problému.

Abstrakt

V této práci řeším problematiku reaktancí a časových konstant synchronních strojů. Nejprve popisuji základní informace o synchronních strojích, jako je konstrukce, rozběh, spouštění, provoz v elektrické síti. Dále jsou z normy vyjmuty samostatné definice. Následuje kapitola s přehledem jak se jednotlivé konstanty počítají z konstrukčních parametrů a na to navazuje kapitola využití těchto reaktancí a časových konstant v praxi. Pak je rozepsána nejpodstatnější kapitola týkající se měření na synchronním stroji a poslední kapitola je o přesnosti měření s ohledem na praktická použití.

Klíčová slova

synchronní stroj, generátor, motor, reaktance, impedance, časové konstanty, zkrat

Abstrakt

In this work I'm dealing with matters of reactance and time constants of synchronous machines. At first I'm describing basic informations about synchronous machines, like construction, run-up, turning on and working in a grid. Furthermore discrete definitions are excluded from normalised specification. Follows chapter with the resume of how are single constants calculated from construction parameters followed by chapter about using this reactancions in real world. Then is specified the most important chapter relating to measuring on synchronous machines and the last chapter is about precision of measure with respect of practical usage of them.

Key words

synchronous machine, generator, motor, reactance, impedance, time constants, short-circuit

Seznam použitých symbolů a zkratk

f	kmitočet
f_N	jmenovitý kmitočet
H	konstanta akumulované energie
I, i	proud
I_N	jmenovitý proud
I_{fk}	budící proud pro jmenovitý proud kotvy nakrátko
I_{fn}	jmenovitý budící proud
K_c	zkratový poměr
$R_{(0)}$	opor nulové složky
$R_{(1)}$	sousledný odpor vinutí kotvy
$R_{(2)}$	zpětný odpor
R_a	odpor kotvy při stejnosměrném proudu
R_f	odpor budícího vinutí při stejnosměrném proudu
s	skluz
S_N	jmenovitý zdánlivý výkon
U, u	napětí
U_N	jmenovité napětí
$X_{(0)}$	nulová reaktance
$X_{(1)}$	sousledná reaktance
$X_{(2)}$	zpětná reaktance
X_d	podélná synchronní reaktance
X'_d	přechodná podélná reaktance
X''_d	rázová podélná reaktance
X_p	Potierova reaktance
X_q	příčná synchronní reaktance
X'_q	přechodná příčná reaktance
X''_q	rázová příčná reaktance
Z	impedance
Z_N	jmenovitá impedance

ΔU_n	jmenovitá změna napětí
δ	zátěžný úhel
τ_a	časová konstanta zkratu vinutí kotvy
τ_{kd}	podélná časová konstanta náhradního tlumícího vinutí nakrátko
τ_{kd0}	podélná časová konstanta náhradního tlumícího obvodu naprázdno
τ'_d	přechodná podélná časová konstanta zkratu
τ'_{d0}	přechodná podélná časová konstanta naprázdno
τ'_q	přechodná příčná časová konstanta zkratu
τ'_{q0}	přechodná příčná časová konstanta naprázdno
τ''_d	rázová podélná časová konstanta zkratu
τ''_{d0}	rázová podélná časová konstanta naprázdno
τ''_q	rázová příčná časová konstanta zkratu
τ''_{q0}	rázová příčná časová konstanta nakrátko
τ_j	doba urychlení stroje
μ	míra sycení
X_L	indukční reaktance
Ω	úhlová frekvence
R_m	magnetický odpor
μ_r	permeabilita prostředí
μ_0	- permeabilita vakua
λ	magnetická vodivost
Φ	magnetický tok
F_m	magnetomotorické napětí
N	počet závitů
L	indukčnost
$X_{1\sigma}$	rozptylová reaktance statorového vinutí
X_{n1}	reaktance drážkového rozptylu
X_{C1}	reaktance kolem čel vinutí
X_{Z1}	reaktance rozptylu zubů
χ_{C1}	koefficient respektující zkrácení kroku
l_i	délka drážky

l_{C1}	délka čela vinutí
l_{Z1}	délka zubu
λ_{C1}	magnetická vodivost prostoru čel
q_1	počet drážek na pól a fázi
p	počet pólových dvojic

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Popis synchronního stroje a jeho provoz	11
2.1. Dělení synchronních strojů	11
2.2. Konstrukce synchronních strojů	11
2.3. Princip synchronního stroje	13
2.4. Spouštění synchronního stroje	14
2.5. Provoz synchronních strojů.....	16
3. Definice konstant synchronního stroje.....	17
4. Vzorce pro výpočet konstant synchronního stroje.....	23
5. Použití konstant synchronního stroje v elektrotechnické praxi	26
6. Měření konstant synchronního stroje ve školních podmínkách.....	28
6.1. Měření naprázdno a nakrátko.....	29
6.2. Měření X_d a X_q skluzovou metodou	32
6.3. Nulové složky	33
6.4. Rázové reaktance	34
6.5. Náhlý zkrat.....	36
6.6. Dvoufázová zkouška nakrátko, pro zjištění X_2 [3].....	37
6.7. Dvojfázová zkouška, s uzlem vinutí, pro zjištění X_0 [3]	38
7. Chyby v měření a jejich vliv na přesnost výpočtů	41
Závěr	43
Literatura.....	45
Přílohy.....	46

1. Úvod

Synchronní stroje, především synchronní generátory, jsou srdcem energetické soustavy. V dnešní době jediným, smysluplným zdrojem střídavého zdroje napětí ať už jej pohání turbína jaderné, tepelné, vodní či jiné elektrárny. Právě tím klíčem, k funkci a práci s těmi to stroji, jsou synchronní reaktance a časové konstanty.

Jedná se o látku poměrně starou, kterou pro československo v roce 1938 zpracoval, podle celosvětových pramenů, především z USA, víceředitel Škodových závodů ing. V. Kulda. I takto starý zdroj, je v dnešní době pořád aktuální a stále platný, změny nastaly téměř jen v označení.

Je nutné podotknout, že se jedná o velice rozsáhlé a složité téma, které není možné shrnout pouze do rozsahu bakalářské práce.

2. Popis synchronního stroje a jeho provoz

2.1. Dělení synchronních strojů

Základní dělení synchronních strojů je na generátory (alternátory) a motory. Alternátory jsou nejvyužívanější stroje pro výrobu střídavé elektrické energie a jsou to největší točivé stroje. Vyrábějí se velikosti desetin VA (W) až po výkony v GVA (GW). Tyto stroje mají vysokou účinnost a nízkou cenu vzhledem k výkonu.

Alternátory i motory, se dále dělí na stroje s hladkým rotorem nebo-li turboalternátory, respektive turbomotory, které se provozují především na otáčkách 3000min^{-1} výjimečně na 1500min^{-1} , pro pohon parními turbínami a s vyniklými póly hydroalternátory, které jsou poháněny vodními turbínami s otáčky od 100min^{-1} do 500min^{-1} . Turbostroje mají malý průměr a velkou délku, hydrostroje mají velký průměr a malou délku.

Synchronní motory se vyrábějí od drobných motorků, například pro využití v automatizační technice, přes ovládání velkých průmyslových čerpadel a ventilátorů až ke strojům řádově v megawattech.

Protože synchronní stroje jsou zdrojem jak činné tak jalové energie, používají se ke kompenzaci jalové energie sítě, tyto stroje se nazývají kompenzátory, jsou to stroje nejčastěji osmipólové respektive šestipólové což odpovídá otáčkám od 750min^{-1} , respektive 1000min^{-1} . Tyto stroje pracují naprázdno, tedy bez zatížení.

2.2. Konstrukce synchronních strojů

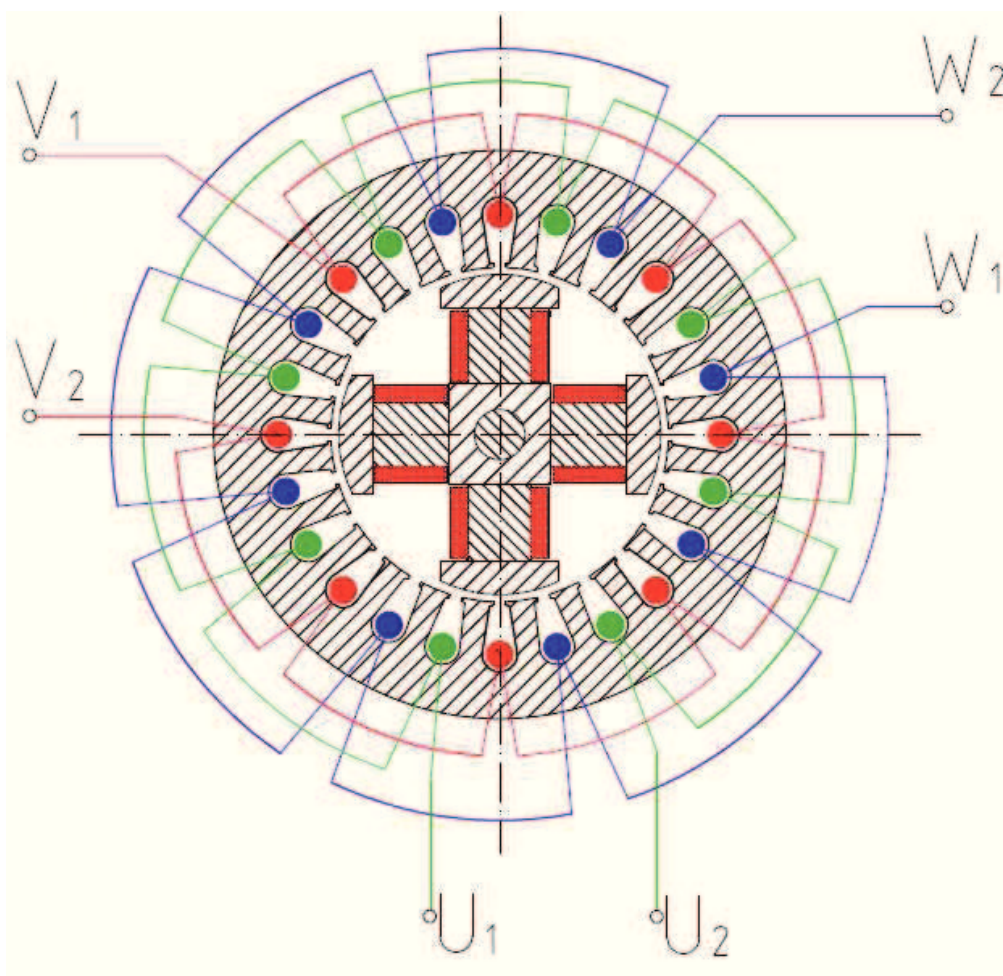
Stator je velice podobný statoru asynchronního motoru a je složen z feromagnetický plechů. V drážkách je uloženo trojfázové vinutí, vinutí kotvy.

Rotor je buďto složený s ocelových plechů u hydroalternátorů nebo z jednoho kusu legované oceli u turbostrojů. Na rotoru je uložené budící vinutí, které je napájené stejnosměrným proudem přes sběrací kroužky nebo přes budič přímo na rotoru. Výkon na rotoru je v porovnání s celým strojem v jednotkách procent.

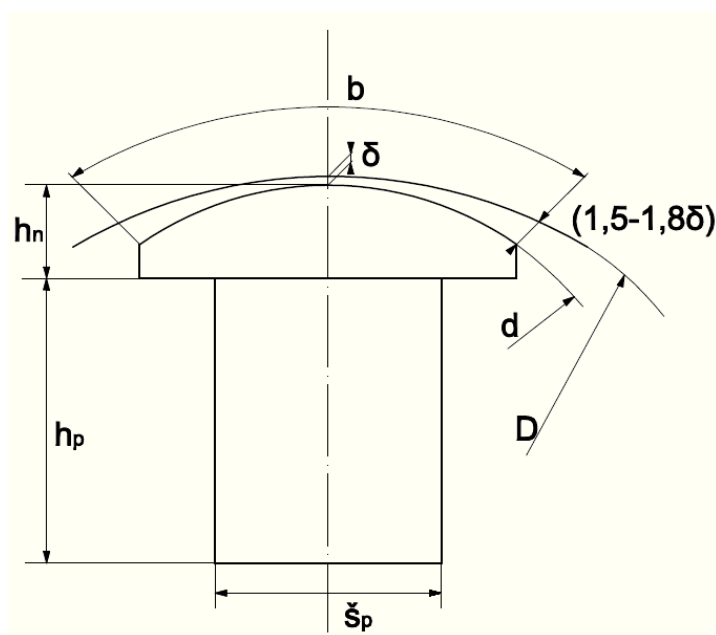
Stroje s hladkým rotorem, mají po 2/3 svého obvodu vyfrézované nebo vyhoblované drážky pro uložení vinutí.

Rotor stroje s vyniklými póly má na magnetickém kole póly s pólovými nástavci, navíc v těchto nástavcích bývá uloženo tlumící vinutí, které slouží pro utlumení kývání a umožňuje jeho nesouměrné zatížení, a také slouží zároveň k asynchronnímu rozběhu stroje.

Chlazení stroje je vzduchem, vodíkem, vodou nebo jejich kombinací. Ztráty u synchronních strojů jsou přibližně 1%, a takový výkon by u velkých strojů nebylo možné odvést vzduchem.



Obr. 1. Vinutí synchronního stroje s vyniklými póly



Obr. 2. Pól a pólový nástavec;

D průměr statoru, d průměr statoru, h_n výška pólového nástavce, h_p výška pólu, δ šířka vzduchové mezery, b šířka pólového nástavce, δ_p šířka pólu

2.3. Princip synchronního stroje

Na budící vinutí je přes kartáče a kroužky přivedeno stejnosměrné napětí, které vybudí v magnetickém obvodu rotoru magnetické pole. Toto pole se při otáčení rotoru točí s točivým polem statoru konstantními (synchronními) otáčkami.

$$n_1 = n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{min}^{-1}; \text{Hz}; -]$$

Kde f_1 je kmitočet napájecí sítě a p je počet pól párů. Ve vinutí statoru se indukuje třífázové napětí, jeho efektivní hodnota jedné fáze je

$$U_{1f} = 4,44 \cdot \Phi_1 \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1} \quad [V, \text{Wb}, \text{min}^{-1}; -; \text{Hz}; -]$$

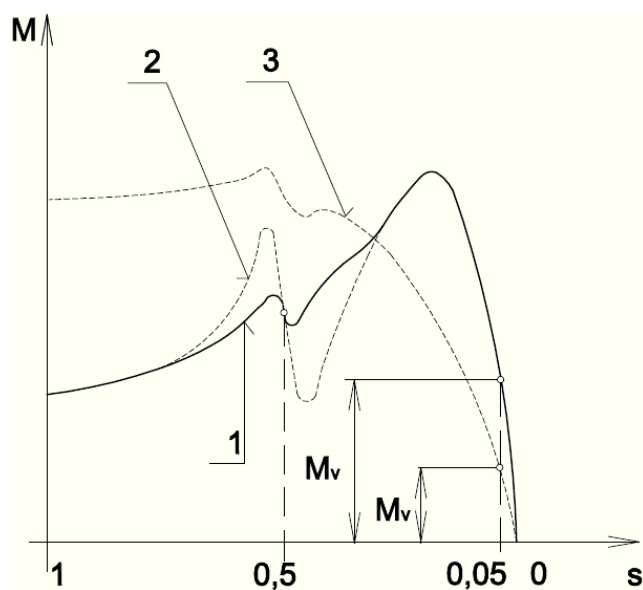
Φ_1 je magnetický tok jednoho pólu N_1 je počet závitů jedné fáze na statoru k_{v1} je činitel vinutí. Do drážek zvolíme vhodně rozložené vinutí a připočteme-li tvar pólových nástavců je průběh U_{1f} je přibližně sinusový.

Protože se magnetická pole statoru a rotoru přitahují unáší točivé magnetické pole statoru, pole rotoru stejnou rychlostí. Pokud rotor zatížíme nezmění se rychlost otáčení rotoru, ale úhel mezi magnetickými póly rotoru a statoru. Tento úhel se nazývá zátěžný a je označován řeckým písmenem β

2.4. Spouštění synchronního stroje

To lze provádět několika způsoby. Hlavní a nejpoužívanější rozběh u synchronních motorů je asynchronní rozběh, ale může být připojen přímo k síti, přes reaktor nebo přes autotransformátor. Dalším způsobem je frekvenčním rozběhem a rozběhem pomocným motorem. Nejvyužívanější je první způsob proto bude podrobněji rozepsán níže.

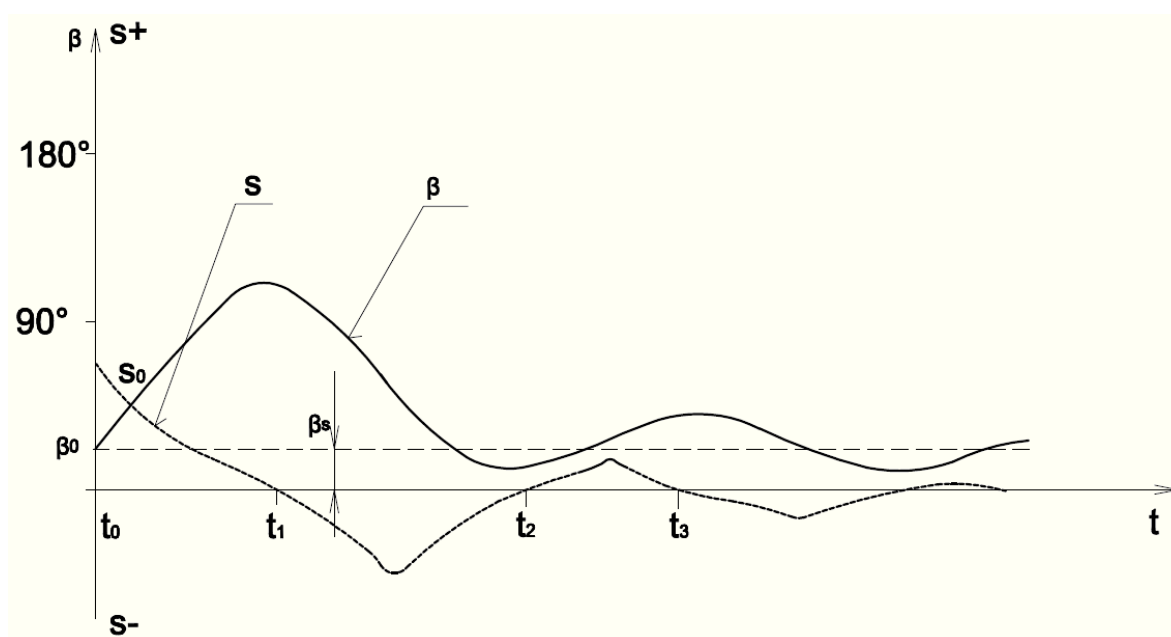
Samotné spuštění se dá rozdělit do dvou etap a to rozběh asynchronním momentem, to je zajištěno rozběhovým (tlumícím) vinutím v pólových nástavcích, u turbostroje slouží jako rozběhové vinutí mosazné klíny v drážkách rotoru a povrch rotoru. Budící vinutí je spojeno dokrátká nebo přes odpor.



Obr. 3 Momentová charakteristika synchronního motoru při asynchronním rozběhu; 1 budící vinutí je uzavřeno přes odpor, rozběhové vinutí provedeno z materiálu o malém odporu, 2 budící vinutí je zkratováno, 3 budící vinutí je uzavřeno přes odpor, rozběhové vinutí provedeno z materiálu o velkém odporu

Po této fázi když skluz $s \leq 0,05$ je budící vinutí připojeno ke zdroji stejnosměrného proudu. Nyní je navíc k asynchronnímu momentu přítomný i synchronní moment, který je závislý na budícím proudu I_b a zátěžném úhlu β .

Protože má motor stále určitý skluz, tak se zátěžný úhel stále mění, v čase kdy je β v intervalu od 0° do 180° se asynchronní a synchronní moment sčítá, tím pádem se skluz snižuje, v momentě kdy je zátěžný úhel od 0° do 90° má rotor v určitém okamžiku synchronní otáčky a je vtažen do synchronismu.



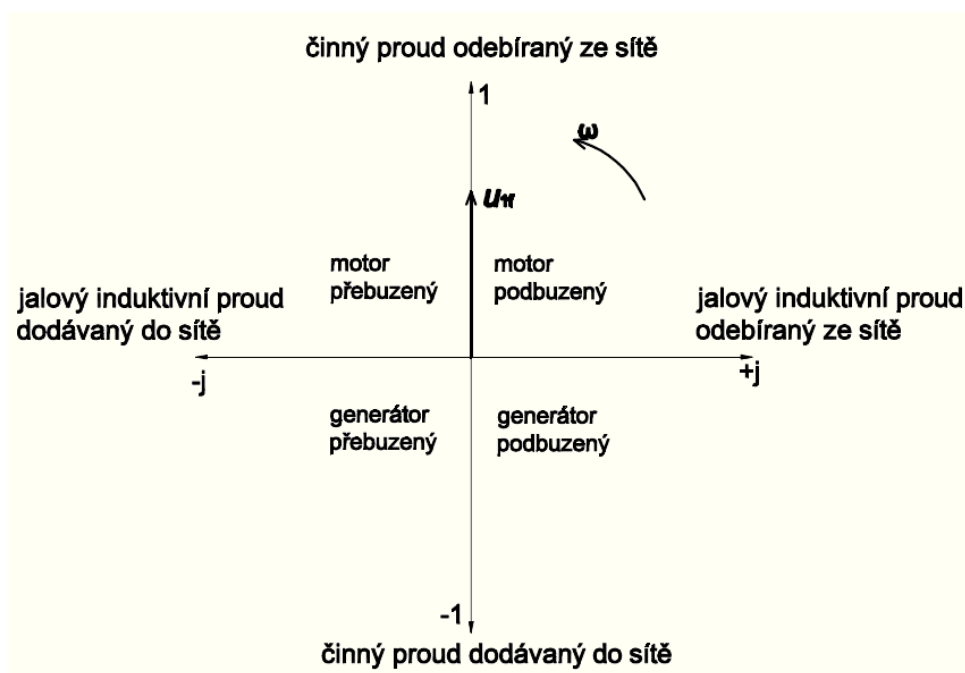
Obr. 4 Průběh vtažení synchronního motoru do synchronismu.

Podrobněji podle obrázku, v čase t_0 se rotor točí asynchronně $s=+s_0$ zátěžný úhel má hodnotu β_0 . Na rotor působí synchronní elektromagnetický moment M_s a asynchronní elektromagnetický moment M_a . Protože se rotor otáčí se zrychlením tak se skluz s snižuje a při čase t_1 dosahuje rotor synchronní rychlosti. Po čase t_1 motor pracuje se záporným skluzem a M_a mění své znaménko, rotor tedy začíná zpomalovat a zátěžný úhel β se postupně snižuje až do t_2 nyní motor opět má synchronní otáčky, rotor dále zpomaluje, ale působením momentů M_a a M_s je v čase t_3 opět dosaženo synchronní rychlosti, toto tlumené kývání se pokračuje, dokud není rotor vtažen do synchronismu a zátěžný úhel nedosáhne stabilní hodnoty β_s což odpovídá mechanické zátěži motoru. Čím je větší působení momentů M_a a M_s , v okolí bodu kdy $s=0$ tím rychleji je motor vtažen do synchronismu.

2.5. Provoz synchronních strojů

Základní provozní stavy synchronních strojů, pro zjišťování jejich parametrů, jsou chod naprázdno (bez zatížení), dále chod nakrátko se zkratovaným vinutím kotvy.

Provozní stavy synchronního stroje jsou motor, mechanický výkon je menší než elektrický, odebírá energii ze sítě a generátor kdy elektrický výkon je menší než mechanický, dodává energii do sítě. Pokud stroj dodává pouze jalovou energii jedná se o synchronní kompenzátor. Generátory dále mohou pracovat v rámci sítě nebo samostatně u tzv. ostrovním provozu.



Obr. 5. provozní stavy synchronního stroje

3. Definice konstant synchronního stroje

Jmenovitá impedance synchronního stroje Z_n [3]

Podíl jmenovitého napájecího napětí a jmenovitého proudu synchronního stroje.

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} [\Omega]$$

Podélná synchronní reaktance X_d [3]

Podíl ustálené hodnoty té základní střídavé složky napětí kotvy, která je vytvořena celkovým podélným tokem způsobeným podélným proudem kotvy, a ustálené hodnoty základní střídavé složky tohoto proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Přechodná podélná reaktance X'_d [3]

Podíl počáteční hodnoty náhlé změny té základní střídavé složky napětí kotvy, která je vytvořena celkovým podélným primárním tokem a počáteční hodnoty současně se měnící základní střídavé podélné složky proudu kotvy, při jmenovitých otáčkách stroje, přičemž se neberou v úvahu rychle zanikající složky v průběhu prvních cyklů.

Rázová podélná reaktance X''_d [3]

Podíl počáteční hodnoty náhlé změny té základní střídavé složky napětí kotvy, která je vytvořena celkovým podélným tokem kotvy a počáteční hodnoty současně se měnící základní střídavé podélné složky proudu kotvy, při jmenovitých otáčkách stroje.

Příčná synchronní reaktance X_q [3]

Podíl ustálené hodnoty té základní střídavé složky napětí kotvy, která je vytvořena celkovým příčným primárním tokem způsobeným příčným proudem kotvy, a ustálené hodnoty základní střídavé složky tohoto proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Přechodná příčná reaktance X'_q [3]

Podíl počáteční hodnoty náhlé změny té základní střídavé složky napětí kotvy, která je vytvořena celkovým příčným tokem vinutí kotvy a počáteční hodnoty současně se měnící

základní střídavé příčné složky proudu kotvy, při jmenovitých otáčkách stroje, přičemž se neberou v úvahu rychle zanikající složky v průběhu prvních pár cyklů.

Rázová příčná reaktance X''_q [3]

Podíl počáteční hodnoty náhle změny té základní střídavé složky napětí kotvy, která je vytvořena celkovým příčným primárním tokem a počáteční hodnoty současně se měnící základní střídavé příčné složky proudu kotvy, při jmenovitých otáčkách stroje.

Zpětná reaktance X_2 [3]

Podíl jalové základní zpětné složky napětí kotvy vyvolané sinusovou zpětnou složkou proudu kotvy jmenovitého kmitočtu, a hodnoty téže složky proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Nulová reaktance, netočivá reaktance X_0 [3]

Podíl jalové základní nulové (netočivé) složky napětí kotvy, vyvolané základní nulovou (netočivou) složkou proudu kotvy jmenovitého kmitočtu, a hodnoty téže složky proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Potierova reaktance X_P [3]

Reaktance, která bere v úvahu rozptyl budícího vinutí při zatížení a v přebuzené oblasti, která se používá místo rozptylové reaktance kotvy pro výpočet buzení při zatížení pomocí Potierovy metody.

Rozptylová reaktance kotvy X_σ [3]

Podíl jalové základní složky napětí kotvy, vyvolané rozptylovým tokem vinutí kotvy, a základní složky proudu kotvy, při jmenovitých otáčkách stroje.

Odpor kotvy R_a [3]

Odpor měřený stejnosměrným proudem mezi svorkami vinutí kotvy, přiřazený určité teplotě vinutí vyjádřený jako fázová hodnota.

Odpor budícího vinutí R_f [3]

Odpor měřený stejnosměrným proudem mezi svorkami budícího vinutí, přiřazený určité teplotě vinutí.

Sousledný odpor, sousledná složka odporu R_1 [3]

Podíl činné sousledné složky napětí kotvy odpovídající ztrátám ve vinutí kotvy a rozptylovým ztrátám při zatížení, která je vyvolána sinusovou souslednou složkou proudu kotvy, a hodnoty téže složky proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Zpětný odpor, zpětná složka odporu R_2 [3]

Podíl činné základní zpětné složky napětí kotvy, která je vyvolána sinusovou zpětnou složkou proudu kotvy, a hodnoty téže složky proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Odpor nulové složky, odpor netočivé složky R_0 [3]

Podíl činné základní složky nulové (netočivé) složky napětí kotvy, která je vyvolána základní nulovou (netočivou) složkou proudu kotvy jmenovitého kmitočtu, a hodnoty téže složky proudu, při jmenovitých otáčkách stroje.

Přechodná podélná časová konstanta naprázdno τ_{d0} [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení pozvolna klesající složky napětí kotvy naprázdno, indukované podélným magnetickým tokem, na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Přechodná podélná časová konstanta zkratu τ_d [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení pozvolna klesající složky zkratového proudu kotvy v podélné ode na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Rázová podélná časová konstanta zkratu τ'_d [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení rychle klesající složky přítomné v prvních několika cyklech ve zkratovém proudu kotvy v podélné ose na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Přechodná příčná časová konstanta naprázdno τ_{q0} [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení pozvolna klesající složky napětí vinutí kotvy naprázdno, indukované příčným magnetickým tokem, na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Přechodná příčná časová konstanta zkratu τ_q [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení pozvolna klesající složky zkratového proudu vinutí kotvy v příčné ose na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Rázová příčná časová konstanta naprázdno τ'_{q0} [3]

Doba, která je po náhle změně provozních podmínkách potřebná pro snížení rychle klesající složky napětí vinutí kotvy naprázdno, indukované příčným magnetickým tokem na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Podélná časová konstanta náhradního tlumícího obvodu naprázdno τ_{kd0} [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná k tomu, aby indukovaná složka proudu v náhradním tlumícím obvodu, s vinutím kotvy a budícím vinutím naprázdno, klesla na $1/e$, tj. 0,368, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Podélná časová konstanta náhradního tlumícího vinutí nakrátko τ_{kd} [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná k tomu, aby indukovaná složka proudu v náhradním tlumícím vinutí, s vinutím kotvy nakrátko a budícím vinutím naprázdno, klesla na $1/e$, tj. 0,368, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Rázová příčná časová konstanta zkratu τ'_q [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení rychle klesající složky přítomné v prvních několika cyklech ve zkratovém proudu vinutí kotvy v příčné ose na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Časová konstanta stejnosměrné složky proudu zkratu vinutí kotvy τ_a [3]

Doba, která je po náhlé změně provozních podmínek potřebná pro snížení stejnosměrné složky přítomné ve zkratovém proudu vinutí kotvy na $1/e$, tj. 0,368 její počáteční hodnoty, přičemž stroj běží při jmenovitých otáčkách.

Doba urychlení τ_j [3]

Doba, která by byla nutná pro přivedení rotujících částí stroje z klidu na jmenovité otáčky, kdyby byl urychlující moment konstantní a rovný podílu jmenovitého činného výkonu a jmenovité úhlové rychlosti.

Konstanta akumulované energie H [3]

Podíl kinetické energie akumulované v rotoru točícího se jmenovitými otáčkami a jmenovitého zdánlivého výkonu.

Jmenovitý budící proud I_{fn} [3]

Proud v budícím vinutí, pracuje-li stroj při jmenovitém napětí, proudu, účinníku a otáčkách.

Budící proud odpovídající jmenovitému proudu kotvy nakrátko I_{fkn} [3]

Proud v budícím vinutí pracuje-li stroj při jmenovitých otáčkách v ustáleném jmenovitém proudu kotvy, přičemž vinutí kotvy (primární vinutí) je spojeno nakrátko.

Frekvenční charakteristiky [3]

Soubor charakteristických křivek nebo analytických výrazů udávajících závislost komplexní admitance nebo její převrácené hodnoty – komplexní impedance – (nebo jejich složek) na skluzu při jmenovitém napájecím kmitočtu, není-li stanoveno jinak .

Zkratový poměr K_c [3]

Zkratový poměr K_c se určí z charakteristiky naprázdno a z trojfázové charakteristiky nakrátko jako podíl budícího proudu odpovídajícího jmenovitému napětí na charakteristice naprázdno a budícího proudu odpovídajícího jmenovitému proudu na charakteristice nakrátko .

$$K_c = \frac{I_{f0n}}{I_{fkn}}$$

Jmenovitá změna napětí [3]

- Z přímého měření
- Jmenovitá změna napětí ΔU_N se určí přímým měřením
- Z charakteristiky naprázdno a známého budícího proudu jmenovitého zatížení

Počáteční rozběhová impedance synchronních motorů Z_{st} [3]

počáteční rozběhová impedance může být určena ze zkoušky při zabržděném rotoru jako:

$$Z_{st} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{av}} [\Omega]$$

Kde

U je připojené sdružené napětí;

I_{av} průměrném tří fázových ustálených proudů naměřených během zkoušky.

Pokud se zkouška provádí při několika hodnotách sníženého napětí, hodnota počáteční rozběhové impedance se určí pro každé napětí a hodnota jmenovitého napětí se může určit extrapolací počáteční rozběhové impedance do hodnoty napětí křivky Z_{st} vynesené v závislosti na připojeném napětí.

Jestliže se měří příkon, počáteční rozběhový odpor a reaktance se určí jako:

$$R_{st} = \frac{P}{3 \cdot I_{av}^2} [\Omega]$$

$$X_{st} = \sqrt{Z_{st}^2 - R_{st}^2} [\Omega]$$

4. Vzorce pro výpočet konstant synchronního stroje

U starších synchronních strojů, u kterých chybí data od výrobce a nemáme možnost změřit konstrukční části, určíme konstanty pomocí měření. Při návrhu motoru se parametry určují při výpočtu. V tomto odstavci uvádím některé základní vzorce pro výpočet důležitých reaktancí stroje.

Pro začátek bych uvedl, několik základních vzorců, které jsou pro následující vztahy klíčové

Indukční reaktance

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L [\Omega] \quad \omega - \text{úhlová frekvence}$$

Magnetický odpor

$$R_m = \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{l}{S} [H^{-1}] \quad \mu_r - \text{permeabilita prostředí}$$

Magnetická vodivost

$$\lambda = \frac{1}{R_m} [H]$$

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{N \cdot I}{R_m} [Wb] \quad F_m - \text{magnetomotorické napětí; } N - \text{počet závitů}$$

Indukčnost

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{N \cdot N \cdot I}{I \cdot R_m} = \frac{N^2}{R_m} [H]$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

Je dána součtem dílčích reaktancí, tedy

$$X_{1\sigma} = X_{n1} + X_{c1} + X_{z1} [\Omega] [2]$$

X_{n1} - reaktance drážkového rozptylu

X_{c1} - reaktance kolem čel vinutí

X_{z1} - reaktance rozptylu zubů

$$X_{1\sigma} = 4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_1^2 \cdot \chi^2}{p} \cdot l_i \cdot \left(\frac{\lambda'_{nl}}{q_1} + \frac{l_{C1}}{l_i} \cdot \lambda_{C1} + \frac{l_{Z1}}{q_1} \right) \cdot \frac{1}{\chi^2} [\Omega] [2]$$

f_1 - frekvence sítě

μ_0 - permeabilita vakua

χ_{C1} - koeficient respektující zkrácení kroku

l_i - délka drážky

l_{C1} - délka čela vinutí

l_{Z1} - délka zubu

λ_{C1} - magnetická vodivost prostoru čel

q_1 počet drážek na pól a fázi

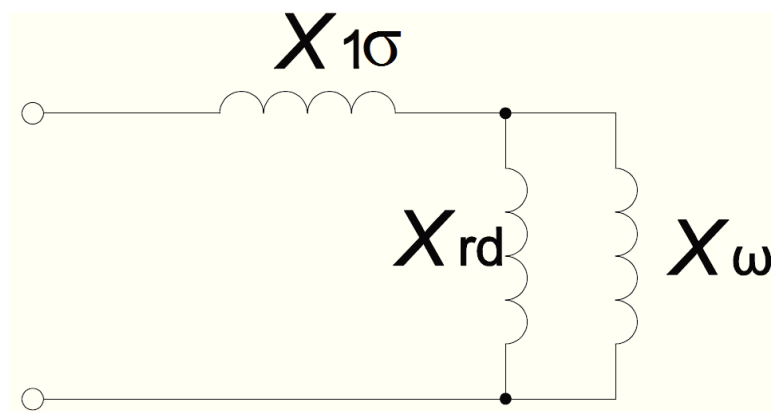
p počet pólových dvojic

Prvá přechodová reaktance

Je rovna rozptylové reaktanci $X_{1\sigma}$, zvětšené o paralelně spojenou reaktanci reakce s rozptylovou reaktancí budícího vinutí

$$X'_d = X_{1\sigma} + \frac{X_{rd} \cdot X_{\omega}}{X_{rd} + X_{\omega}} [\Omega] [2]$$

Kde X_{ω} je reaktance budícího vinutí



Obr. 6 Náhradní schéma zkratového obvodu synchronního stroje[2]

Druhá přechodná reaktance

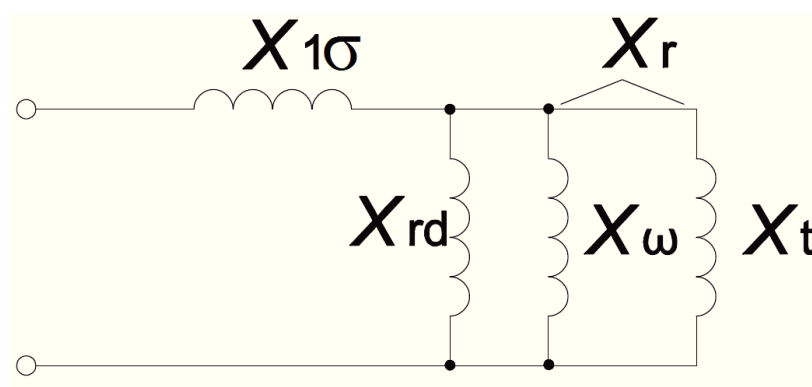
Je rovna reaktanci rozptylové $X_{1\sigma}$ zvětšené o paralelně spojenou reaktanci reakce X_{rd} s rozptylovou reaktancí rotoru

$$X''_d = X_{1\sigma} + \frac{X_{rd} \cdot X_r}{X_{rd} + X_r} = X_{1\sigma} + \frac{X_{rd} \cdot X_\omega \cdot X_t}{X_{rd} \cdot X_\omega + X_{rd} \cdot X_t + X_\omega \cdot X_t} [\Omega] [2]$$

Kde X_t je reaktance tlumícího vinutí

X_r je rozptylová reaktance rotoru

$$X_r = (X_\omega \cdot X_t) / (X_\omega + X_t) [\Omega] [2]$$



Obr.7 Náhradní schéma druhé přechodné reaktance[2]

5. Použití konstant synchronního stroje v elektrotechnické praxi

V elektrotechnické praxi se veškeré konstanty synchronních strojů získávají přímo od výrobce. Pro stroje do výkonů přibližně 20MVA se dá uvažovat s konstantami uvedenými v následující tabulce:

Parametry	značka	turbostroje	hydroalternátory, motory
<i>Poměrné reaktance</i>			
rázová sycená	x''_d	0,15	0,15
přechodná sycená	x'_d	0,25	0,35
synchronní nenasycená - podélná - příčná	x_d	2	1,2
	x_q	1,8	0,9
netočivá sycená	x_0	0,1	0,12
zpětná sycená	x_2	0,15	0,15
rozptylová statoru	x_σ	0,15	0,2
<i>Časové konstanty</i>			
budicího obvodu naprázdno	τ'_{d0}	5s	5s
rázová	τ''_d	0,05s	0,03s
přechodná	τ'_d	0,5s	0,5s
stejnoseměrné složky	τ_a	0,1s	0,05s

Tab. 1. Typické průměrné hodnoty parametrů synchronních strojů [8]

Konstanty se využívají především pro výpočty zkratů a z hodnot zkratů jsme pak schopni určit nastavení ochran a dimenzování vodičů v elektrických obvodech. Pro názornost uvádím jednoduchý příklad výpočtu počátečních rázových zkratových proudů 1.f., 2.f a 3.f. zkratu přímo za generátorem měřeným v laboratoři. Potřebná data jsou získána z mých měření na generátoru. Příklad je počítán v poměrných hodnotách.

Zvolený vztažný výkon $S_v=10\text{kVA}$

Výkon generátoru $S_G=10\text{kVA}$

Jmenovitá impedance stroje

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 14,5} = 15,9\Omega$$

Přepočet reaktancí z fyzikálních jednotek na vztažné

$$x''_d = \frac{X''_d}{Z_n} = \frac{4,09}{15,9} = 0,257$$

$$x_0 = \frac{X_0}{Z_n} = \frac{1,72}{15,9} = 0,108$$

Sousledná reaktance generátoru

$$x_{G(1)} = x_{G(2)} = x''_d \cdot \frac{S_V}{S_G} = 0,257 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 0,257 \text{ [7]}$$

Netočivá reaktance generátoru

$$x_{G(0)} = x_0 \cdot \frac{S_V}{S_G} = 0,108 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 0,109 \text{ [7]}$$

Celková reaktance sousledná a netočivá

$$x_{k(1)} = x_{k(2)} = x_{G(1)} = 0,257$$

$$x_{k(0)} = x_{G(0)} = 0,109$$

Vztažný proud

$$I_v = \frac{S_G}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 14,43 \text{ A [7]}$$

3.f. zkrat

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot I_v}{x_{k(1)}} = \frac{1,13 \cdot 14,43}{0,257} = 63,45 \text{ A [7]}$$

2.f. zkrat

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_v}{x_{k(1)} + x_{k(2)}} = \frac{1,13 \cdot \sqrt{3} \cdot 14,43}{0,257 + 0,257} = 54,95 \text{ A [7]}$$

1.f.zkrat

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot 3 \cdot I_v}{x_{k(1)} + x_{k(2)} + x_{k(0)}} = \frac{1,13 \cdot 3 \cdot 14,43}{0,257 + 0,257 + 0,109} = 78,52 \text{ A [7]}$$

Nejvyšší zkratový proud je při 1.f. zkratu. Na tento proud musíme dimenzovat zařízení proti účinku zkratového proudu. Při nastavení ochran se budeme snažit dostat co nejnižší zkratový proud, a proto budeme volit nižší hodnotu koeficientu c .

6. Měření konstant synchronního stroje ve školních podmínkách

Měření reaktancí synchronních strojů není jednoduché, protože to nejsou konstanty, ale hodnoty proměnné, související s magnetickou indukcí nebo s velikostí proudu ve vinutí statoru a se vzájemnou polohou magnetického kola proti magnetické indukci při různých uvažovaných stavech. Pro různé reaktance se uvažují různé stavy stroje, např. nasycený/nenasycený.

Reaktance a časové konstanty řešíme za účelem:

- určení největší hodnoty proudu ve vinutí statoru při zkratu a jeho časový průběh
- určení potřebného buzení pro různá zatížení
- určení stability chodu strojů v rozsáhlých sítích.

Dáváme přednost měření při němž stroj není nutno rozebírat nebo úplně demontovat.

Měření proběhlo v laboratoři elektrických strojů na synchronním stroji TP 21/b s těmito parametry:

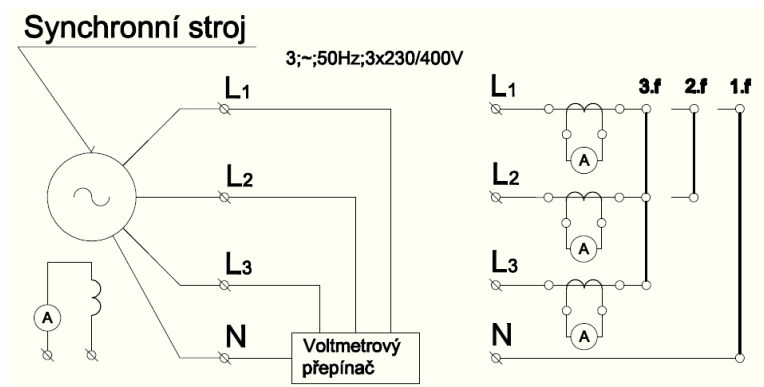
Výkon $S=10\text{kVA}$	$P=3\text{kW}$	Tvar M101
Stator zapojen do Y $U_n=400\text{V}$, $I_n=14,5\text{A}$		Typ A8b6 02
Buzení $U_b=14\text{--}56\text{V}$; $I_b=3,4\text{--}9,3\text{A}$		Číslo 549024
Otáčky 1000min^{-1}		Rok výroby 1968
50Hz $\cos\varphi=0,3$		

Byla provedena tato měření:

- Naprázdno a nakrátko
- Měření podélné a příčné reaktance skluzovou metodou
- Měření nulových složek impedance
- Měření rázových reaktancí natáčivou metodou
- Měření reaktancí a časových konstant metodou náhlého zkratu
- Zkouška při dvojfázovém spojení nakrátko, pro zjištění X_2
- Zkouška při dvojfázovém spojení nakrátko s uzlem vinutí, pro zjištění X_0

6.1. Měření naprázdno a nakrátko

Zapojení



Obr.8 schéma zapojení, pro měření naprázdno a nakrátko

Postup měření naprázdno

Roztočíme synchronní stroj na jmenovité otáčky. Postupně zvyšujeme budící proud od hodnot $I_b=0A$ až na maximální štítkovou hodnotu. Neprovádíme měření do maxima z důvodu častého zatěžování generátoru tímto měřením. Zvláště důkladně proměřujeme oblast kolem U_n . Odečítáme všechna tři fázová napětí a do grafu vyneseme jejich algebraický průměr. Dále provedeme postupné snižování budícího proudu od poslední nejvyšší hodnoty až na $I_b=0A$. Při snižování I_b nastavujeme shodné hodnoty jako při zvyšování I_b . Rovněž tuto křivku vyneseme. Charakteristika naprázdno je střední křivka mezi křivkou při $I_b \uparrow$ a $I_b \downarrow$.

Postup měření nakrátko

Postupně snižujeme budící proud od hodnoty pro I_{3k} (I_{2k}, I_{1k})= $1,2 \cdot I_{1fn}$ až do hodnoty cca $0,3 \cdot I_{1fn}$. Provedeme maximálně sedm měření. Charakteristiky nakrátko jsou přímky.

Tabulky naměřených hodnot

$I_b[A]$	$U_{fL1}[V]\downarrow$	$U_{fL2}[V]\downarrow$	$U_{fL3}[V]\downarrow$	$U_{fL1}[V]\uparrow$	$U_{fL2}[V]\uparrow$	$U_{fL3}[V]\uparrow$
0	6,8	6,8	6,8	9,8	9,8	9,8
1	82	82	82	94	94	94
2	168	168	168	174	174	174
2,5	180	180	185	200	200	200
2,7	195	195	195	212	212	212
2,9	210	210	210	220	220	220
3,1	216	216	216	224	224	224
3,3	222	222	222	232	232	232
3,5	228	228	228	230	230	230
3,7	235	235	235	240	240	240
3,9	238	238	238	245	245	245
5,1	260	260	260	260	260	260
6,5	275	275	275	275	275	275
8,5	290	290	290	290	290	290
11	305	305	305	305	305	305

Tab. 1. Měření naprázdno

$I_b[A]$	$I_{fL1}[A]$	$I_{fL2}[A]$	$I_{fL3}[A]$
5	17,6	17,6	17,8
4,5	16	16	16
3,8	13,6	13,6	13,6
3,1	11,2	11,2	11,2
2,5	9	9	9,2

Tab. 2 Měření 3-pólové spojení nakrátko

$I_b[A]$	$I_{fL1}[A]$	$I_{fL2}[A]$	$I_{fL1}[A]$	$I_{fL3}[A]$	$I_{fL2}[A]$	$I_{fL3}[A]$
3,5	18	18	18	18	18	18
3	15,6	15,6	16	16	16	16
2,5	13,6	13,6	13,6	13,6	13,4	13,4
2	10,8	10,8	11	11	10,6	10,6

Tab. 3 Měření 2-pólové spojení nakrátko

$I_b[A]$	$I_{fL1}[A]$	$I_{fL2}[A]$	$I_{fL3}[A]$
2	19,2	18,4	18,8
1,8	17,6	17,2	17,2
1,6	14,8	14,8	15,2
1,4	13,6	13,6	13,2
1,2	12	11,4	11,2

Tab. 4 Měření 1-pólové spojení nakrátko

Tabulky vypočtených hodnot

$I_b [A]$	0	1	2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	5,1	6,5	8,5	11
$U_f [V]$	8,8	88	171	191	204	215	220	227	229	238	242	260	275	290	305

Tab. 5 Vypočítané hodnoty Naprázdno

$I_b [A]$	5	4,5	3,8	3,1	2,5	0
$I_f [A]$	17,67	16	13,6	11,2	9,07	0

Tab. 6 3- Vypočítané hodnoty pólové spojení nakrátko

$I_b [A]$	3,5	3	2,5	2	0
$I_f [A]$	18	15,87	13,5	10,8	0

Tab. 7 Vypočítané hodnoty 2-pólové spojení nakrátko

$I_b [A]$	2	1,8	1,6	1,4	1,2	0
$I_f [A]$	18,8	17,33	14,9	13,5	11,5	0

Tab. 8 Vypočítané hodnoty 1-pólové spojení nakrátko

Výpočty

Podélná synchronní reaktance odpovídající nenasyčenému stavu

$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{325}{14,5} = 22,41[\Omega]$$

Míra sycení

$$\mu = \frac{I_{b0}}{I_{b\partial 0}} = \frac{3,45}{2,83} = 1,22[-]$$

Zkratový poměr

$$K_C = \frac{I_{k0}}{I_{1fn}} = \frac{12,25}{14,5} = 0,845[-]$$

Tabulka vypočtených hodnot

$X_d [\Omega]$	μ	K_c
22,41	0,3986	0,9869

Tab. 8 Vypočítané hodnoty

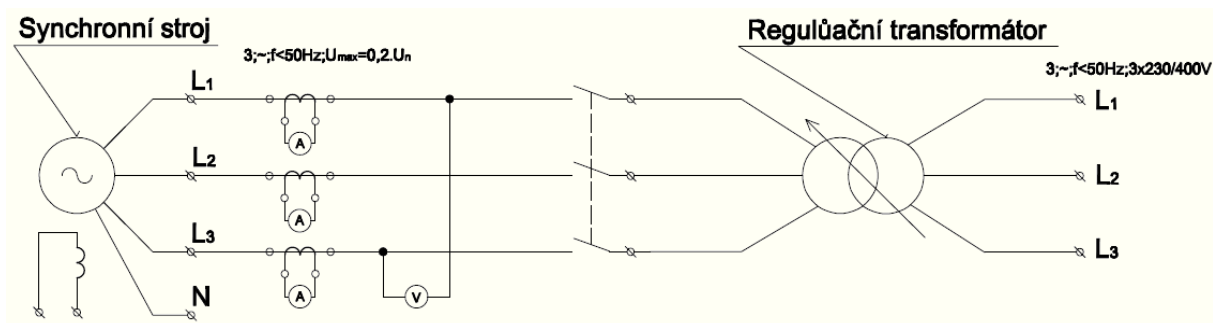
Graf průběhu naprázdno a nakrátko je v příloze A

6.2. Měření X_d a X_q skluzovou metodou

Postup měření

Synchronní stroj nejprve roztočíme naprázdno, nabudíme a sledovačem fází zjistíme směr točení magnetického pole statoru. Stejně tak zjistíme směr točení magnetického pole sítě. Pro spojení stroje se sítí je nutné, aby se obě pole točila souhlasně. Prokazatelně odpojíme buzení (nejlépe na svorkách stroje). Stroj se otáčí podsynchronními otáčkami k síti (skluz cca 1%) a po připojení regulačního zdroje s nulovým výstupním napětím postupně zvyšujeme napětí na svorkách synchronního stroje. Sledujeme výchylky A-metru a V-metru a regulujeme otáčky a napětí tak, abychom byli schopni odečíst maxima a minima výchylek A-metru a V-metru.

Zapojení



Obr.9 schéma zapojení, pro měření X_d a X_q skluzovou metodou

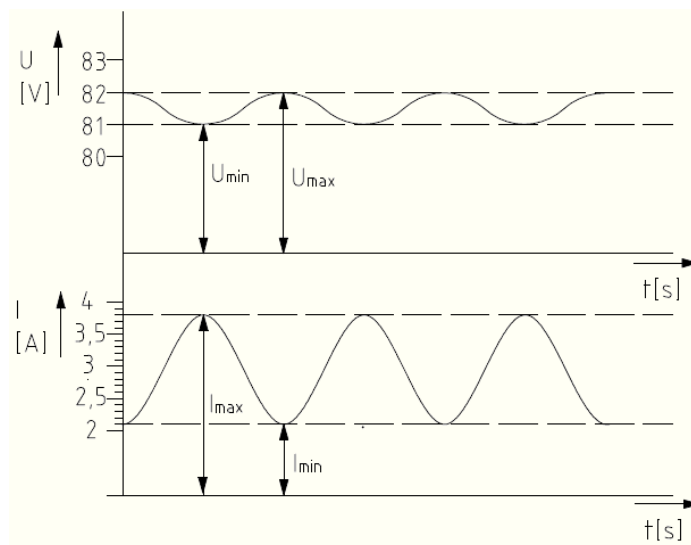
Naměřené a vypočtené hodnoty

$$U_{\max}=82\text{V } I_{\min}=2,1\text{A}$$

$$U_{\min}=81\text{V } I_{\max}=3,8\text{V}$$

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} \cdot I_{\min}} = \frac{82}{\sqrt{3} \cdot 2,1} = 22,54\Omega$$

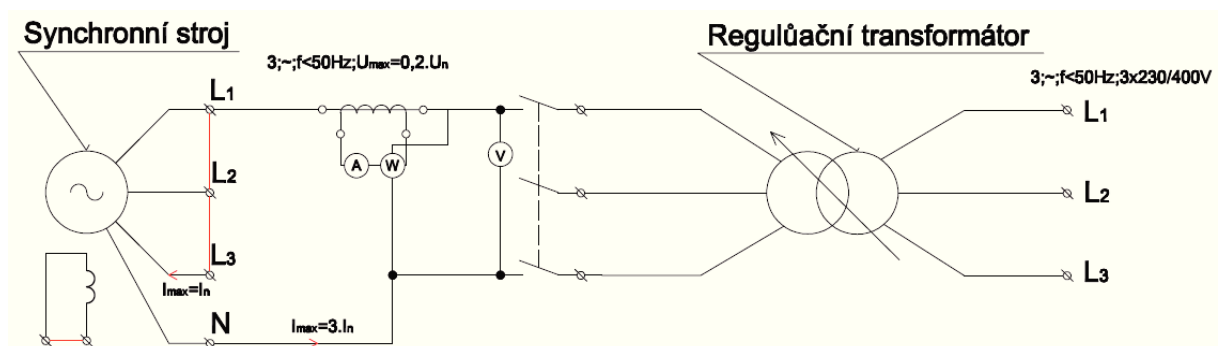
$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} \cdot I_{\max}} = \frac{81}{\sqrt{3} \cdot 3,8} = 12,31\Omega$$



Obr.10 nastínění průběhu napětí a proudu při zkoušce

6.3. Nulové složky

Zapojení



Obr.11. schéma zapojení, pro měření nulových složek

Synchronní stroj se otáčí synchronními otáčkami, buzení je prokazatelně spojeno nakrátko (nejlépe na svorkách stroje). Po připojení regulačního zdroje s nulovým výstupním napětím postupně zvyšujeme napětí na svorkách synchronního stroje tak, aby fází stroje (synchronní stroj má statorové vinutí zapojené do Y) tekla maximální jmenovitý proud. Pro ustálený stav (neměníme napětí na zdroji) odečteme výchylky A-metru, V-metru a W-metru.

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{1,7^2 - 0,46^2} = 1,72\Omega$$

34

Postup měření

Synchronní stroj se neotáčí, v obvodu je zapojen střídavý A-metr, statorové vinutí je napájeno dvoufázově z regulovaného zdroje. Po připojení regulačního zdroje s nulovým výstupním napětím postupně zvyšujeme napětí na svorkách synchronního a zároveň pomalu ručně otáčíme rotorem tak, až najdeme největší výchylku na A-metru v obvodu buzení. Napájecí napětí by nemělo přesáhnout $0,3 \cdot U_n$ (kvůli oteplení). Pro ustálený stav (neměníme napětí na zdroji) odečteme výchylky A-metru, V-metru a W-metru v obvodu statoru dvakrát. Poprvé, když je výchylka A-metru v obvodu buzení maximální (pro X''_d) a podruhé když je výchylka A-metru v obvodu buzení nulová (pro X''_q).

Naměřené a vypočtené hodnoty

Maximum	Minimum
---------	---------

$I=4,2\text{A}$	$I=1,5\text{A}$
-----------------	-----------------

$U=29,25\text{V}$	$U=30,5\text{V}$
-------------------	------------------

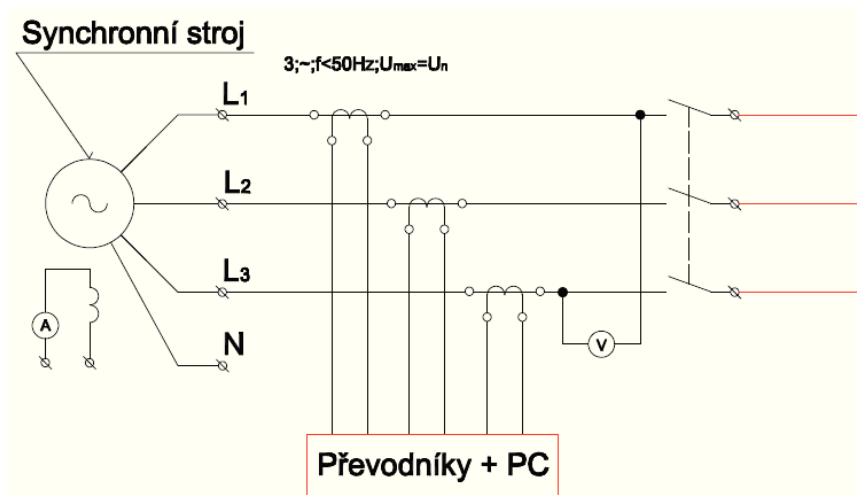
$P=40\text{W}$	$P=16,25\text{W}$
----------------	-------------------

$$X''_d = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{29,25}{4,2}\right)^2 - \left(\frac{40}{4,2^2}\right)^2} = 3,29\Omega$$

$$X''_q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{30,5}{1,5}\right)^2 - \left(\frac{16,25}{1,5^2}\right)^2} = 9,5\Omega$$

6.5. Náhlý zkrat

Zapojení



Obr.13 schéma zapojení, pro měření náhlého zkratu

Postup měření

Synchronní stroj se otáčí synchronní rychlostí. Po vybuzení na statorové napětí maximálně U_n provedeme třífázový zkrat statorového vinutí a průběh statorového proudu zaznamenejeme (např. pomocí PC). Před zkratem provedeme odečet budícího proudu I_b a statorového napětí U_{1f} .

Naměřené a vypočtené hodnoty [4]

Před zkratem $U_{1f}=180V$; $I_b=2,4A$; I_{3k} pro buzení 2,4A z měření nakrátko má ustálenou efektivní hodnotu 8,625A a tedy maximální hodnotu rozkmitu $2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3k}=24,4A$

$$\text{určení měřítka } \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3k}}{\text{rozkmit}} = \frac{24,4}{28,5} = 0,856 A/mm$$

rozkmit je odečtený z grafu

Hodnoty odečtené ze semilogaritmického grafu jsou

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 76A \rightarrow i'_{k0} = \frac{76}{2 \cdot \sqrt{2}} = 26,87 A$$

$$0,368 \cdot i'_{k0} = 27,97 A \rightarrow \tau_d' = 0,1075s$$

rozdíl maxima I'_{km} a extrapolované hodnoty $2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0}$ dostáváme

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i''_{k0} = 2 \cdot I'_{km} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 100 - 76 = 24 A \rightarrow i''_{k0} = \frac{24}{2 \cdot \sqrt{2}} = 8,48 A$$

$$0,368 \cdot i''_{k0} = 0,368 \cdot 24 = 8,832 A \rightarrow \tau_d'' = 0,015$$

Určíme

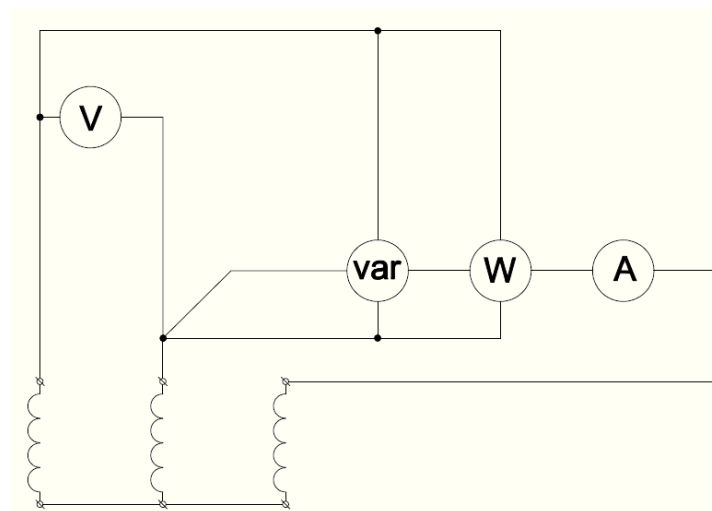
$$X'_d = \frac{U_{1f}}{I_{3k} + i'_{k0}} = \frac{180}{8,625 + 26,87} = 5,07 \Omega$$

$$X''_d = \frac{U_{1f}}{I_{3k} + i'_{k0} + i''_{k0}} = \frac{180}{8,625 + 26,87 + 8,48} = 4,09 \Omega$$

Průběh zkratového proudu a vymezení obalových křivek oscilogram proudu jsou v příloze B, C, D

6.6. Dvoufázová zkouška nakrátko, pro zjištění X_2 [3]

Zapojení



Obr.14 schéma zapojení, pro měření X_2

Postup měření

Pro provedení dvoufázové zkoušky nakrátko se kterékoliv dvě fázové svorky spojí nakrátko viz. schéma zapojení a stroj se pohání jmenovitými otáčkami pomocí pohonu.

Měří se proud nakrátko I_{k2} , budící proud a napětí U_{k2} mezi volnými fázovými svorkami a jednou z vykrácených svorek.

Pro zvýšení přesnosti měření se v případě existence harmonických napětí nebo proudu doporučuje měřit činný výkon P a jalový výkon Q .

Měření se provádí při několika hodnotách proudu nakrátko.

Aby se zabránilo závažnému nadměrnému oteplení masivních částí, má být doba trvání dvoufázového spojení nakrátko při proudu vyšším než $0,3 \cdot I_n$ omezena na dobu potřebnou pro odečtení hodnot naměřených na přístrojích.

Naměřené a vypočtení hodnoty

$$P=210\text{W}$$

Z trojúhelníku výkonů

$$I=5\text{A}$$

$$U=44\text{V}$$

$$\cos\varphi=0,7$$

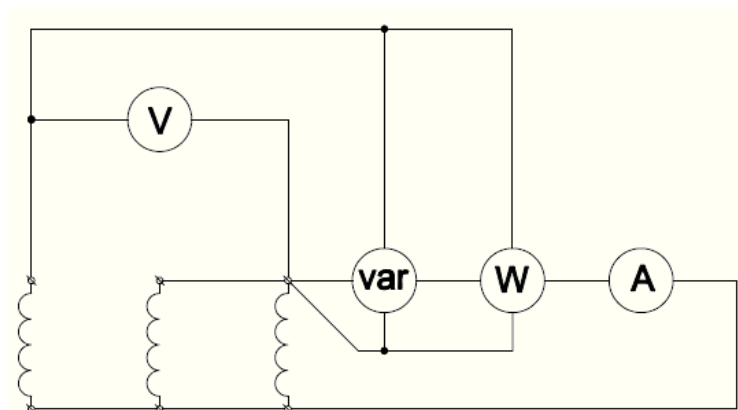
$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \rightarrow Q = P \cdot \operatorname{tg}(\cos^{-1}\varphi) = 210 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,7) = 214\text{Var}$$

$$X_2 = \frac{U^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{44^2}{214} \cdot \frac{214^2}{210^2 + 214^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 2,66\Omega$$

$$R_2 = \frac{U^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{44^2}{210} \cdot \frac{210^2}{210^2 + 214^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 2,61\Omega$$

6.7. Dvoufázová zkouška, s uzlem vinutí, pro zjištění X_0 [3]

Zapojení



Obr.15 schéma zapojení, pro měření X_0

Pro provedení zkoušky při dvoufázovém spojení nakrátko s uzlem vinutí je vinutí kotvy zapojeno do hvězdy, dvě fázové svorky jsou spojeny nakrátko a s uzlem a stroj je poháněn jmenovitými otáčkami a je buzen (viz. schéma zapojení).

Měří se napětí U_0 mezi volnou a fázovou svorkou a uzlem vinutí a proud I_0 protékající mezi fázovými svorkami spojenými nakrátko a uzlem vinutí.

Kvůli zahrnutí vlivu harmonických se měří činný a jalový výkon.

Měření se provádějí při několika hodnotách proudu tekoucího do uzlu vinutí. Hodnoty proudu a doba trvání zkoušky jsou omezeny nadměrným oteplením rotoru nebo vibracemi.

Naměřené a vypočtené hodnoty

$P=29W$ Z trojúhelníka výkonu

$I=4,75A$

$U=46V$

$\cos\varphi=0,025$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \rightarrow Q = P \cdot \operatorname{tg}(\cos^{-1} \varphi) = 29 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,025) = 1159,63 \text{Var}$$

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} = \frac{46^2}{1159,63} \cdot \frac{1159,63^2}{29^2 + 1159,63^2} = 1,82 \Omega$$

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} = \frac{46^2}{29} \cdot \frac{29^2}{29^2 + 1159,63^2} = 0,0456 \Omega$$

	1	2	3	4	5	6
$X_d [\Omega]$	22,41	22,54				
$X'_d [\Omega]$					5,07	
$X''_d [\Omega]$				3,29	4,09	
$X_q [\Omega]$		12,31				
$X''_q [\Omega]$				9,5		
$X_0 [\Omega]$			1,72			1,82
$X_2 [\Omega]$						2,66

Tab. 9 Souhrnná tabulka naměřených reaktancí

- 1 - Měření naprázdno a nakrátko
- 2 - Měření X_d a X_q skluzovou metodou
- 3 - Nulové složky
- 4 - Rázové reaktance
- 5 - Náhlý zkrat
- 6 - Dvoutřífázová zkouška nakrátko, pro zjištění X_2 a X_0

Použité měřicí přístroje

A-metr ~ e.č. 14482 t.p. 1

A-metr ~ e.č.14474 t.p. 1

A-metr ~ e.č 588618 t.p. 1

A-metr = ML 20 e.č.2531148

Voltmetr 14159-t.p.1,5

MTP: Metra Blansko, t.p. 0,05 e.č. 3054890

MTP: Metra Blansko, t.p. 0,05 e.č. 2520141

MTP: Metra Blansko, t.p. 0,05 e.č. 2520143

Wattmetr EL21 $\cos\varphi=1$, t.p. 0,2

7. Chyby v měření a jejich vliv na přesnost výpočtů

V elektrotechnické praxi jsou klíčové zkoušky nakrátko, naprázdno a zkouška náhlým zkratem. Pokud jsou tyto zkoušky pečlivě provedené, jsou výsledky těchto zkoušek dostatečně přesné pro další použití. Na chybu mají vliv přesnosti přístrojů a především metodika měření.

Při zkoušce naprázdno a nakrátko nejčastěji chyby vznikají při ručním rýsování této charakteristiky, hlavně v počátku lineární části charakteristiky naprázdno, kde odečtené výsledky zkresluje remanentní magnetismus, proto je důležité si zvolit vhodná měřítka, aby charakteristika měla takový tvar, abychom co nejvíce zamezili chybě při odečtu.

Jak již bylo v předchozí kapitole zmíněno, hlavním zdrojem údajů reaktancí a časových konstant je výrobce. Na zhrubé výpočty postačí následující tabulka, která je již upravena pro parametry, které jsem měřil a hodnoty z tabulky se porovnají s hodnotami změřenými.

Parametry	značka	hydroalternátory, motory
<i>Poměrné reaktance</i>		
rázová sycená	x''_d	0,15
přechodná sycená	x'_d	0,35
synchronní nenasycená - podélná	x_d	1,2
- příčná	x_q	0,9
netočivá sycená	x_0	0,12
zpětná sycená	x_2	0,15
<i>Časové konstanty</i>		
rázová	τ''_d	0,03s
přechodná	τ'_d	0,5s

Tab. 10. Typické, průměrné hodnoty synchronních strojů, pro kontrolu mého měření

Pro převedení poměrných hodnot na fyzikální musíme násobit poměrné hodnoty jmenovitou impedancí stroje Z_n .

$$X''_d = x''_d \cdot Z_n = 15,9 \cdot 0,15 = 2,385 \Omega$$

$$X'_d = x'_d \cdot Z_n = 15,9 \cdot 0,35 = 5,565 \Omega$$

$$X_d = x_d \cdot Z_n = 15,9 \cdot 1,2 = 19,08 \Omega$$

$$X_q = x_q \cdot Z_n = 15,9 \cdot 0,9 = 14,31 \Omega$$

$$X_0 = x_0 \cdot Z_n = 15,9 \cdot 0,12 = 1,908 \Omega$$

$$X_2 = x_2 \cdot Z_n = 15,9 \cdot 0,15 = 2,385 \Omega$$

	Tabulková hodnota	Naměřená hodnota
X''_d	2,385 Ω	4,09 Ω (3,29 Ω)
X'_d	5,565 Ω	5,07 Ω
X_d	19,08 Ω	22,41 Ω (22,54 Ω)
X_q	14,31 Ω	12,31 Ω
X_0	1,908 Ω	1,72 Ω (1,82 Ω)
X_2	2,385 Ω	2,66 Ω
τ''_d	0,03 s	0,015 s
τ'	0,05 s	0,1075 s

Tab 11. srovnání tabulkových a naměřených hodnot

Závěr

Cílem této práce bylo rozebrat téma synchronních strojů a zaměřit se na jejich reaktance a časové konstanty. Rozebrat základní konstrukce, principy a hlavně se soustředit na problematiku měření časových konstant.

První měření je jedno ze základních, které se provádí na většině strojů, jedná se o měření naprázdno a nakrátko. Změřil jsem charakteristiku naprázdno, křivka se nejprve chová lineárně, dále se vlivem nasycení začíná zakřivovat do horizontální polohy. Budící obvod byl buzen ss proudem od $I_b=0A$, v obvodu vzniká magnetické pole, které při následném snižování I_b zůstalo v magnetickém obvodu, tento magnetismus se nazývá remanentní, proto v průběhu U_{1f} vzniká hysterze.

Dále jsem měřil stroj v 1.f., 2.f. a 3.f kombinaci spojení nakrátko jednotlivých vývodů stroje viz. schéma. Charakteristiky nakrátko se chovají lineárně. Vynesem měření naprázdno a nakrátko do grafu lze získat hodnoty souslednou reaktanci X_d , zpětnou reaktanci X_2 , nulovou reaktanci X_0 , míru syčení μ a zkratový poměr K_c . U tohoto měření je nejproblematictější narýsovat graf tak aby se z něj daly odečíst hodnoty, pro určení zpětné a nulové reaktance, čehož jsem nebyl schopen ani při opětovném přerýsování.

Měření X_d a X_q skluzovou metodou, při tomto měření je proud vůči napětí posunut o 90° proto když je napětí v maximu je hodnota proudu v minimu a naopak, ty to hodnoty maxim a minim odečteme. Při dosazení do vzorce získáme hodnoty opět X_d a X_q , Vidíme že odchylka podélné reaktance při první a druhém měření je nepatrná.

Při měření nulových složek, jsme odečítali pouze výkon, napětí a proud stroje, při budícím spojení nakrátko. Vypočetl jsem nulou impedanci, odpor a pomocí Pythagorovi věty dopočetl nulovou reaktanci.

Při měření rázové reaktance jsem nastavoval maximální hodnotu proudu, ručním otáčením rotoru, pro minim proudu byly odečtené hodnoty použiti do výpočtu rázové příčné reaktance a maximální podélné což je primární hodnota pro výpočty zkratu.

Při zkouška náhlým zkratem je nejdůležitější její rychlé provedení, protože stroj touto zkouškou, oproti ostatním měřením, nejvíce trpí. Do PC se zaznamenal průběh zkratu, vybral jsem si nejlepší průběh, nanesl na něj obalové křivky, sejmul amplitudy a poznamenal si k nim jednotlivé časy. Od hodnot odečetl velikost ustálené složky. Výsledné

hodnoty jsem vynesl do semilogaritmického času, body spojil a dostal obalovou křivku proudů. Tečnou od konce křivky jsem dostal hodnotu i'_{k0} , jejím vynásobením hodnotou 0,368 (viz. norma) jsem dostal hodnotu proudu, z které jsem vynesl vodorovnou přímku, která protne obalovou složku proudu, vynesením svislice dostáváme přechodnou časovou konstantu τ_d' . Rozdílem maximální hodnoty zkratového proudu a hodnotou $2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0}$ dostáváme hodnotu druhého přechodového proudu i''_{k0} , z kterého lze určit rázová časová konstanta τ_d'' . Z přechodového a zkratového proudu po dosazení do vzorců jsou vypočteny přechodové a rázové reaktance.

Poslední dvě zkoušky pro zjištění X_2 a X_0 , se provedli změřením napětí, proudu, výkonu a účinníku. Pro měření hodnot pro zpětnou reaktanci má účinník dostatečně velkou hodnotu pro správný odečet proto dostačující pro vyhovující výsledek zpětné reaktance. Oproti tomu při měření hodnot pro výpočet nulové reaktance, se účinník blížil nule, k čemuž není použití měřicí přístroj konstruován aby z něj byly odečtené hodnoty dostatečně přesné.

I přes náročnost tohoto tématu, jsem byl obohacen o mnoho poznatků z tohoto odvětví, tato práce má veliký potenciál o další rozšíření, jak v měření a teoretické části, například vztah mezi generátorem a sítí.

Literatura

- [1] Kulda, V.: Reaktance a časové konstanty synchronních strojů:
ELEKTROTECHNICKÝ OBZOR: týdeník elektrotechnického svazu
československého, 1938,
20. květen, roč. 27, č 20, s. 309-313; 27. květen, roč. 27, č 21, s. 326-329; 3. červen,
roč 27, č 22, s. 342-348; 17. červen, roč 27, č 24, s. 376-380; 24.červen, roč 27, č
25, s. 394-397; červenec, roč 27, č 26, s.407-413
- [2] Keppert S.: Elektrické stroje – IV Synchronní stroje
- [3] ČSN EN 60034-4 ed.2 35 0000 Točivé el. stroje – Část 4: Metody určování veličin
synchronních strojů ze zkoušek
- [4] Bašta J., Kulda V., Zoubek Z.: Měření na Elektrických strojích: 5. Měření na
synchronních strojích
- [5] Petrov G.N.: Elektrické stroje 2, Asynchronní stroje – Synchronní stroje
- [6] Chmelík K.: Asynchronní a synchronní stroje elektrické stroje
- [7] Medvec Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, návody do cvičení
- [8] Pauza, J.: Výpočet proudů při zkratech, příloha časopisu Elektrotechnik, 1988

Přílohy

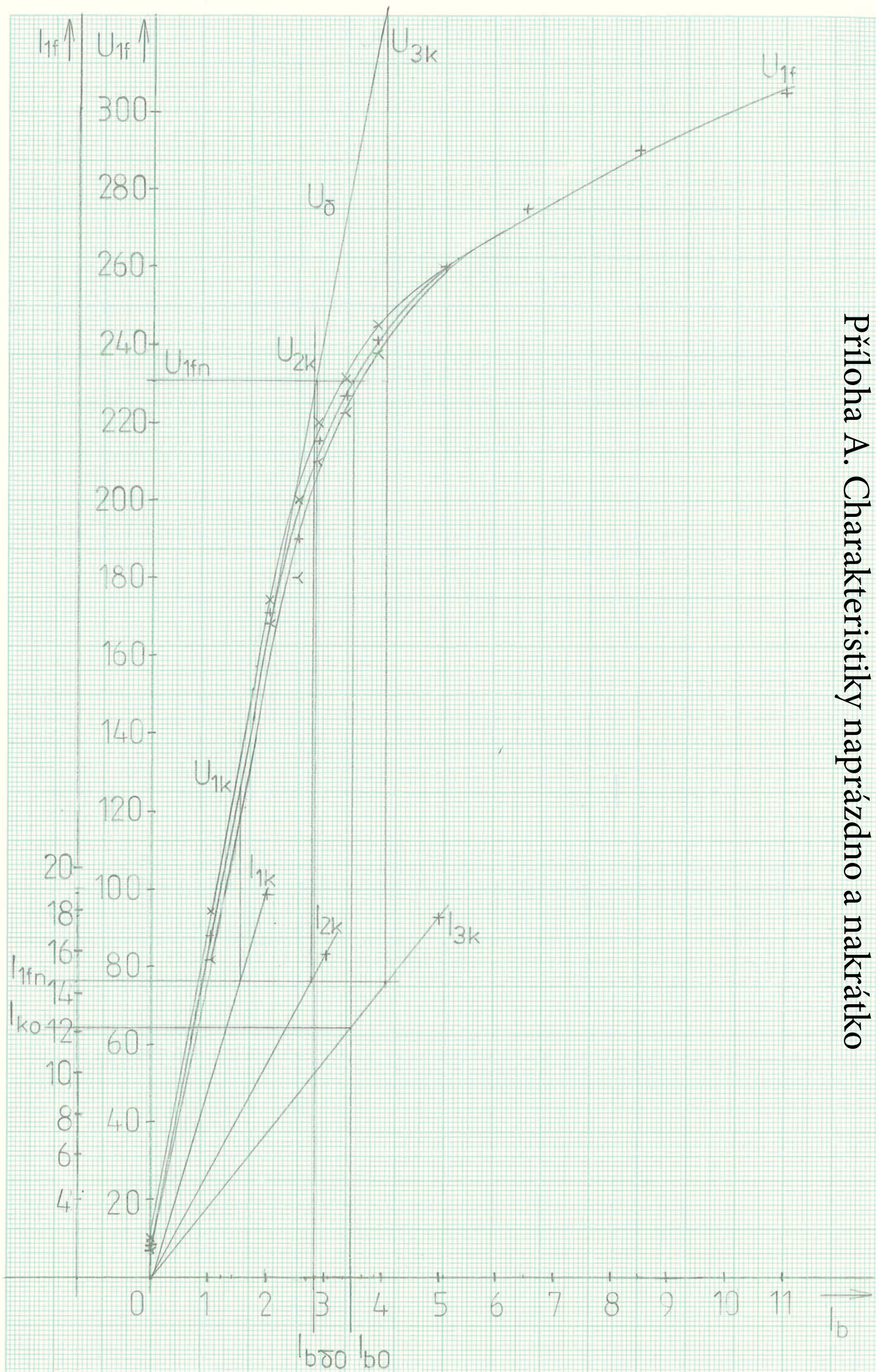
A Charakteristiky naprázdno a nakrátko

B Průběh zkratového proudu – 3.fáze

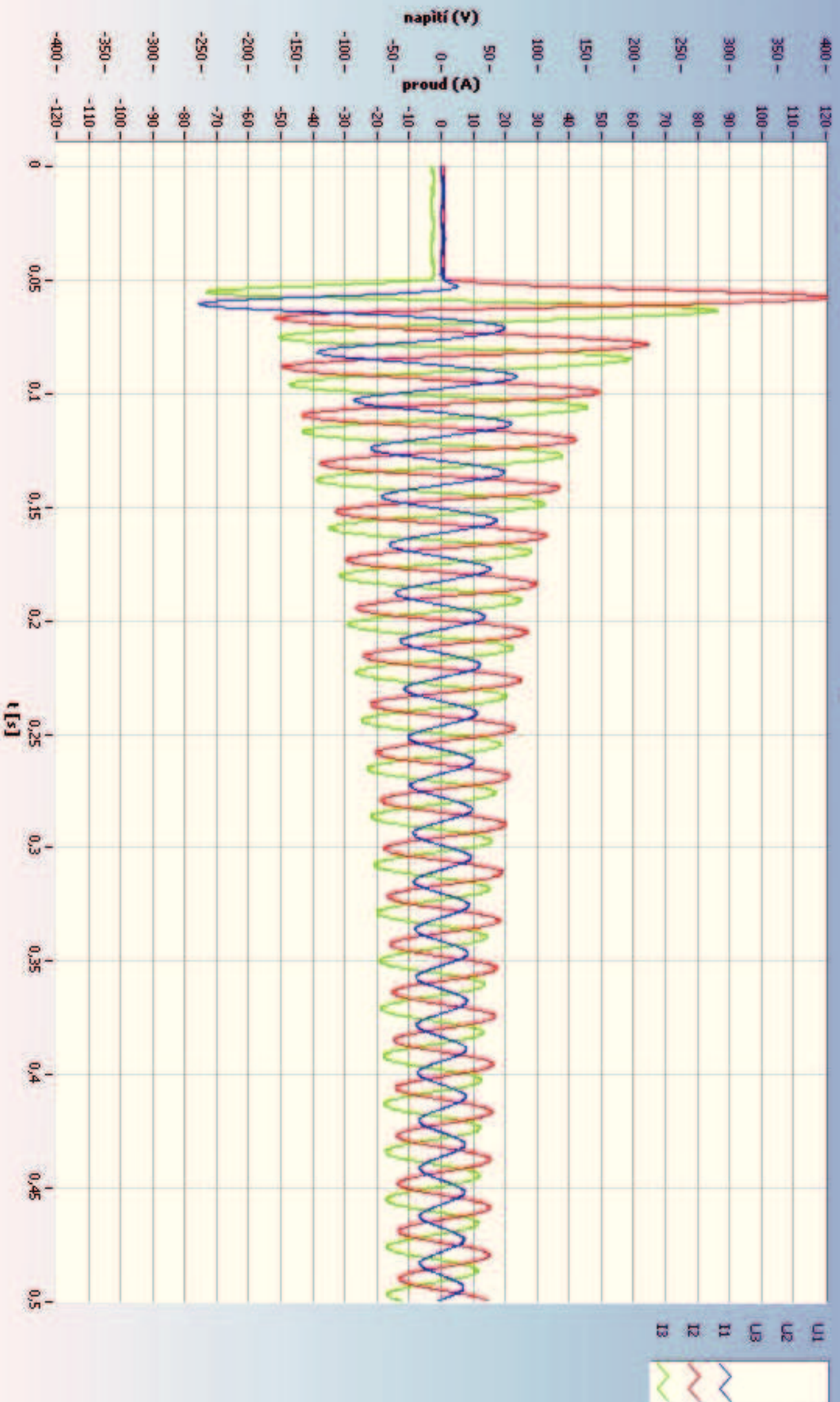
C Průběh zkratového proudu – vybraná fáze

D Oscilogram proudu zkratu

Příloha A. Charakteristiky naprázdno a nakrátko



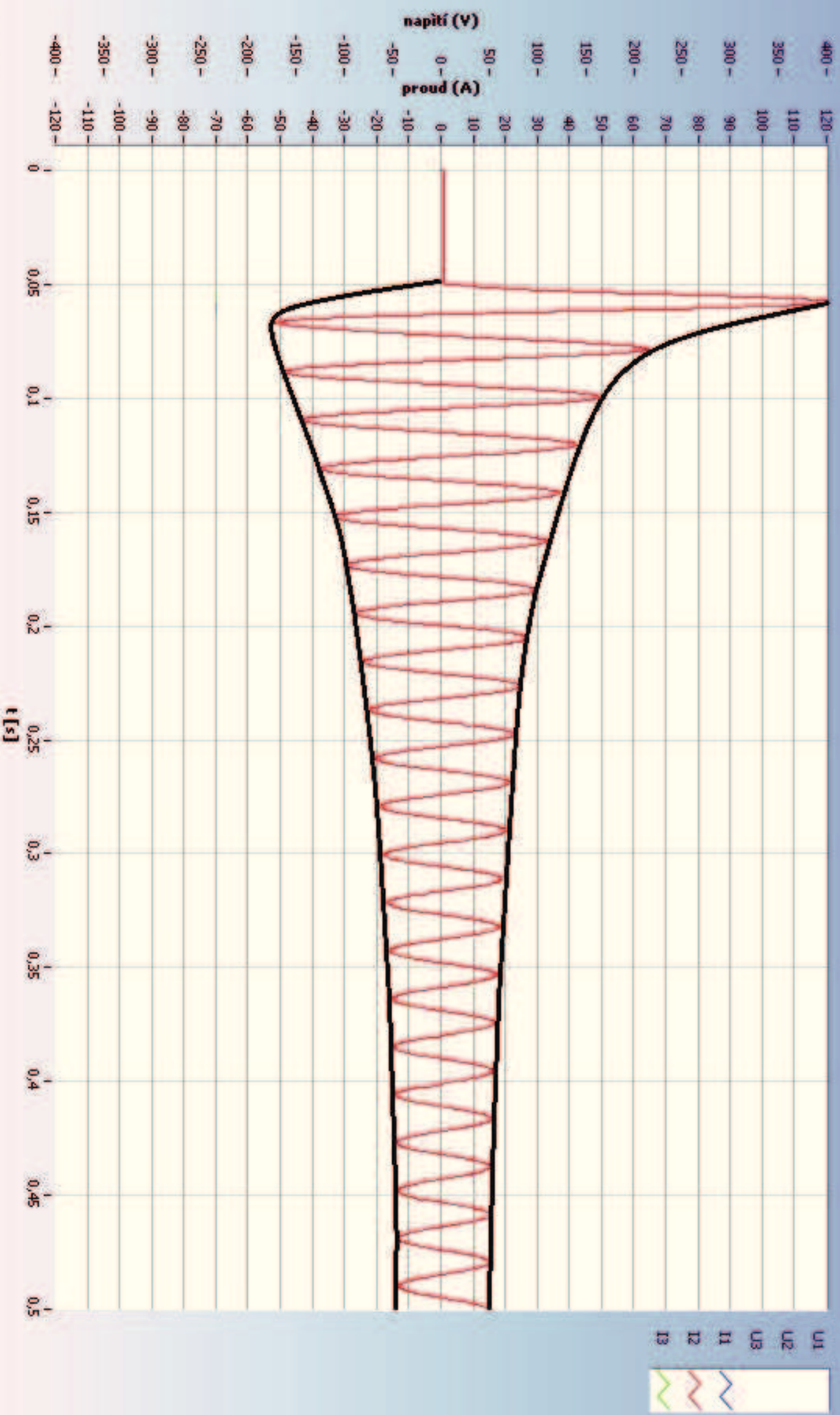
Příloha B. - Příběh zkratového proudu - 3. fáze



scan backlog

17614

Příloha C. - Průběh zkratového proudu - vybraná fáze



Příloha D. - Oscilogram proudu zkratu

